干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2018.05.02

大气红外探测器(AIRS)资料在塔克拉玛干沙漠的适用性检验与评估①

马玉芬[1,2,3]， 潘红林[2,3]， 张海亮[2]， 刘军建[2]， 李 曼[2]， 杜 鹃[2]
(1 中国科学院大气物理研究所,北京 100029； 2 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002；
3 中亚大气科学研究中心,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 由于沙漠恶劣的环境,观测站点稀少,塔克拉玛干沙漠地区的温度、湿度时空分布很难仅仅依靠少量的常规观测资料分析得到,高分辨率的大气红外探测器(AIRS)资料可有效弥补这个空缺。地形和地表发射率是影响AIRS反演温湿度廓线产品进度的两大要素,在塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠地区使用AIRS温湿度产品必须首先对其质量进行检验。本研究主要对2016年7月1~15日晴空背景下AIRS反演的温度、位势高度、水汽数据在塔克拉玛干沙漠及周边绿洲地区在早晨和傍晚的可信度作了详细的对比分析。结果表明:(1)AIRS卫星资料集里的温度资料与探空数据有很好的吻合度。温度资料在沙漠腹地尚有较小偏差,在周边绿洲地区尤其是其中高层一致性较高。AIRS反演温度在沙漠腹地的塔中站在早晨各层的偏差明显大于傍晚,其余各站早晨和傍晚反演偏差不大。(2)AIRS卫星测得的位势高度资料几乎与探空资料的完全一致,是本对比研究中观测质量最好的要素,但AIRS探测层次能达到1 hPa,探测高度优于探空。(3)反演的湿度廓线与探空偏差较大。AIRS资料的混合比在300 hPa上的高层与探空吻合,在中层偏干,低层偏湿,低层水汽探测误差可能与盆地地形和沙漠下垫面有关。(4)早晨沙漠腹地的塔中站AIRS反演气温平均偏差在各层均比其余7个绿洲站明显偏大,在500 hPa以下的低层明显偏冷,在其上明显偏暖,偏暖幅度随高度的升高而增大。早晨绿洲AIRS反演温度在所有气压层上温度偏差绝对值均在1 ℃以内,均方根误差小于2 ℃,傍晚偏差绝对值在3 ℃以内,均方根误差在700 hPa以下的低层较高层大,700 hPa以上在3℃以内。绝对误差在早晨和傍晚均随高度的升高而减小,在100 hPa以上又有逆转,这种逆转在塔中站尤为明显。

关 键 词: AIRS; 塔克拉玛干沙漠; 质量检验; 探空
中图分类号: P412.2 **文献标识码:** A **文章编号:**

塔克拉玛干沙漠位于新疆的塔里木盆地中央(图1),面积达33×10⁴ km²,是世界第二大沙漠,在陆气相互作用以及水文循环中所起的作用不可忽视[1-2]。研究分析在全球变暖背景下塔克拉玛干沙漠及周边地区的水汽变化,对保护和改善该地区的生态环境和促进当地社会经济的持续稳定发展意义重大[3]。然而,由于沙漠观测站点稀少,塔克拉玛干沙漠地区的水汽分布仅仅依靠少量的地面和周边共7个探空观测资料分析得到[4-6]。缪启龙等[7]利用塔中80 m观测塔温度、湿度资料和周边地区的探空资料,分析了南疆沙漠腹地近地层四季的晴天温度、湿度廓线分布特征。何清等[8]也借助塔中80 m铁塔监测数据对塔中沙漠大气边界层结构等进行了详细分析。杨兴华等[9]利用系留探空、近地层梯度铁塔及地面气象站观测的数据,对塔克拉玛干沙漠腹地一次沙尘暴天气过程前后温、湿廓线等大气边界层特征量进行了分析。王敏仲等[10]借助地基风廓线雷达对沙尘浓度进行了定量分析。崔丽娜等[11]利用沙漠腹地地基GPS数据、周边探空资料、MODIS近红外水汽资料对塔克拉玛干沙漠水汽进

① **收稿日期:** 2018-04-04; **修订日期:** 2018-07-23
基金项目: 中亚大气科学研究基金(CAAS201815);国家自然科学基金新疆联合基金项目(A-N2015007);国家自然科学基金(41575008,41805075);新疆维吾尔自治区科技支撑项目(201433112)
作者简介: 马玉芬(1981-),女,新疆,硕士,副研究员,主要从事数值天气预报、中尺度数值模拟及资料同化研究. E-mail: mayf@idm.cn

行初步分析。王敏仲等[12]借助多源地基观测对晴空背景下的沙漠边界层结构进行了研究。由于缺乏对浩瀚的塔克拉玛干沙漠水平分布均匀、垂直探测高度较高的观测,使得研究区域也仅限于沙漠局部和近地层。因此须借助于卫星遥感探测[13]及高分辨率的数值模式。

只有当全球大气温度、水汽探测精度达到无线电探空的水平,才可能对天气预报做出重大的改进。TOVS 和 ATOVS 探测系统都没能达到此要求[14],而大幅提高微波垂直探测能力不太可能,因此,人们更多地把发展红外新技术放到了首位。研究表明,当仪器光谱分辨能力高于 1 000,且辐射测量精度优于 0.2 K 时,卫星大气温度和湿度探测的精度可以达到无线电探空温湿度的水平[15],试验证明数值天气预报同化应用和灾害天气监测预警等更加显示出高光谱探测的强大优势[16]。

装载于 Aqua 卫星的有大气红外探测器(AIRS)[17]结合先进的微波探测器(AMSU)和湿度探测器(HSB),可以穿透云层对大气做精确的温、湿度廓线反演[18-19],已逐渐成为大气垂直探测的主流和方向。与飞机定点观测相比,AIRS 水汽数据大多是无偏的[20],仅在 100 hPa 以上标准误差为 25% 左右。AIR 反温度在对流层顶和中上层具有较高的精度[21],增加地表发射率和地形等预报因子,可提高近地面的反演精度[22],因此,在地表发射率极大且变率极高的沙漠地区检测该地区 AIRS 温湿度产品的质量就显得尤为必要。AIRS 反演的水汽产品,在沙漠地区的精确度究竟如何,是否能够利用该产品研究沙漠上空水汽分布和变化,目前,尚缺乏这方面的讨论。国内在前期的相关研究工作涉及到了复杂地形条件下的 AIRS 反演精度问题[23-24],并未涉及到沙漠下垫面条件下对 AIRS 温湿度产品的检验问题,本研究的创新点正在于此。

鉴于沙漠地区对流层下层的 AIRS 反演的大气温度、湿度质量仍有待商榷,要研究塔克拉玛干沙漠地区的温湿度廓线特征须首先对对流层低层的 AIRS 反演大气温度、湿度进行偏差分析。本研究将利用沙漠腹地的塔中站及绿洲地带的库尔勒、库车、阿克苏、喀什、和田、民丰、若羌等 8 个探空站资料,对 AIRS 反演的水汽产品、温度产品和位势高度产品在塔克拉玛干沙漠沙漠及其周边绿洲地区的质量进行检验。

1 资料来源

本文所用的资料主要有 2016 年 7 月 1 日 ~7 月 15 日 AIRS 反演温度湿度廓线资料和加密观测试验所获得的 L 波段秒级探空加密资料。AIRS 资料来源于 GES DISC (Goddard Earth Science Data and Information Services Center) 网站(http://disc.gsfc.nasa.gov)。AIRS-L2 级产品以 EOS-HDF 格式存放,每 6 min 生成一个数据文件。AIRS-L2 标准产品文件包含有地面气温及 28 层的温度廓线与 15 层湿度廓线等数据集[25]。

探空资料包括来源于中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所组织的 2016 年加密观测试验和常规探空资料。塔中站为加密探空资料,加密探空采用的探测设备包括 GPS 探空系统、辐射观测系统。其中,GPS 探空系统由北京长峰微电科技有限公司研制,该系统主要由地面接收系统和 GPS 探空仪组成。探空气球携带探空仪升空进行探测,地面接收系统接收探空仪发射的无线电信号,计算解析出大气的温度、湿度、压力、风向、风速等气象信息。探空观测时间为 2016 年 7 月 1 日 ~7 月 15 日,每日观测 2 次,分别为 01:15、07:15、13:15、19:15。探空气球的平均升速大约为 300 $m \cdot min^{-1}$,一次探测大约需要 90 min 时间。其余 7 个站每天有 4 个时次的探空数据,分别在 11:15 和 23:15(北京时)。本文要将 NASA GES DISC 第 6 版的温度、高度场以及混合比产品,与 L 波段秒级探空资料的相应物理量进行比较,其中探空资料的混合比资料由 Tetens 经验公式[26]计算得出。

2 资料处理

由于地形和下垫面类型对 AIRS 温湿度廓线的反演有较大影响,本研究选择地处沙漠腹地的塔中站及绿洲地带的库尔勒、库车、阿克苏、喀什、和田、民丰、若羌等 7 个探空站为实况,并分析根据地形特征(图 1a)和土地利用类型(图 1b)将 8 个探空站分为沙漠站、小面积绿洲站和大面积绿洲站,分别分析每一组站点上空 AIRS 反演温度、湿度、位势高度与探空观测相比的偏差分布特征。图 1b 基于 USGS 24 类土地利用类型数据[27]绘制(表 1)。

站点资料的筛选原则是 AIRS 扫描时间与探空站点距离最近。由于两套资料在空间上不完全一

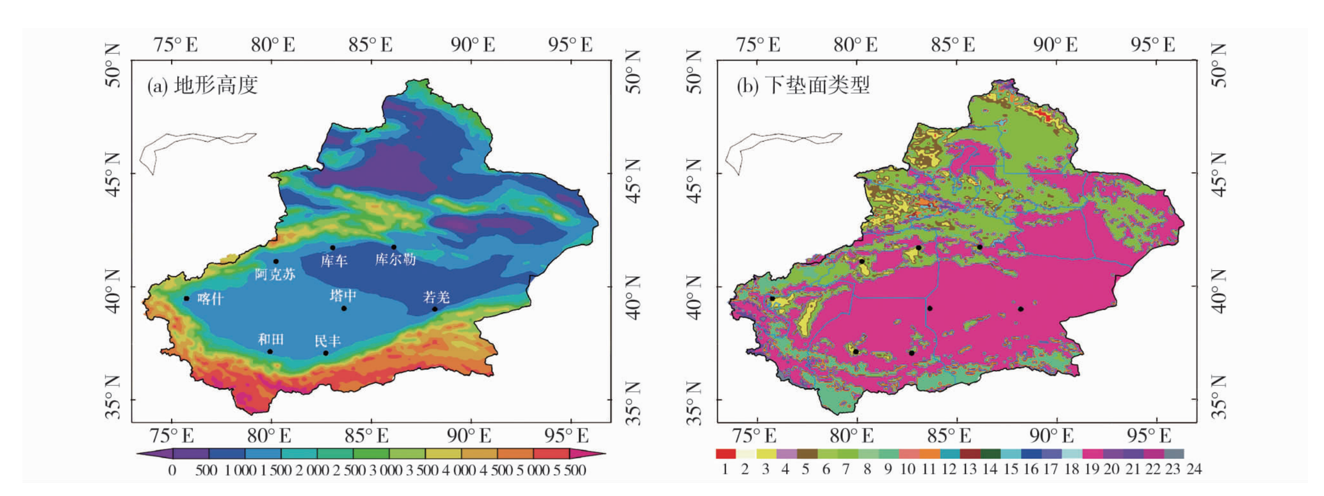


图 1　研究区域地形高度和下垫面类型

Fig. 1　Landuse category and topography of target region

表 1　USGS 24 类土地利用类型

Tab. 1　Land-use classes with 24 category from USGS

分类	描述	分类	描述
1	城市	13	常绿阔叶林
2	旱地/草地	14	常绿针叶林
3	灌溉农田/牧场	15	混交林
4	混合旱地/灌溉农田	16	水
5	农田/草原马赛克	17	草本沼泽
6	农田/林地马赛克	18	树木繁茂的湿地
7	草地	19	贫瘠或疏生植物
8	灌丛	20	草本苔原
9	混合灌木/草地	21	森林冻原
10	稀树草原	22	混合苔原
11	落叶阔叶林	23	裸地苔原
12	落叶针叶林	24	雪或冰

致,会产生一定的误差,因此限制最大偏差距离为 20 km,即观测站点位置与卫星反演数据位置的距离超过 20 km 就不做处理[27]。筛选出的对比站点如表 2 所示。

为定量了解 AIRS 卫星反演资料和探空实测资料之间的差异,本文计算了对应站点上卫星反演资料与实测资料之间的平均偏差和均方根误差。其中,平均偏差的定义为:

$$BIAS = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(f_r - r_n) \tag{1}$$

均方根误差的定义为:

$$RMSE = \left\{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}((f_r - r_n)^2)\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

表 2　代表站点与 AIRS 扫描点的对应表

Tab. 2　Selected 8 sounding sites and their corresponding AIRS scan points

代表区域	探空站点	地形高度 / m	探空站点经纬度		AIRS 扫描点经纬度	经度偏差	纬度偏差	距离 / km	AIRS 扫描时间	探空时间	时间间隔
沙漠	塔中	1 099.0	83.63°E,39.04°N	早晨	88.11°E,38.92°N	0.07	0.09	12.89	3 日 07:42	3 日 11:15	03:33
				傍晚	83.67°E,39.11°N	0.02	0.04	8.52	4 日 20:24	4 日 19:15	01:09
小面积绿洲	若羌	888.3	88.18°E,39.01°N	早晨	88.11°E,38.92°N	0.07	0.09	12.89	3 日 07:42	3 日 11:15	03:33
				傍晚	88.33°E,39.15°N	0.15	0.03	19.91	1 日 19:54	1 日 23:16	03:20
	民丰	1 409.3	82.72°E,37.07°N	早晨	82.60°E,36.95°N	0.12	0.12	17.09	5 日 07:30	5 日 11:17	03:47
				傍晚	82.60°E,37.21°N	0.12	0.12	18:56	1 日 19:54	1 日 23:16	03:20
	和田	1 374.5	79.93°E,37.13°N	早晨	80.09°E,37.23°N	0.17	0.10	18.04	13 日 08:18	13 日 11:15	02:57
				傍晚	79.97°E,37.08°N	0.04	0.05	6.87	2 日 20:36	2 日 23:17	02:41
大面积绿洲	喀什	1 288.7	75.75°E,39.48°N	早晨	75.86°E,39.62°N	0.12	0.15	17.63	3 日 07:42	3 日 11:15	03:33
				傍晚	75.73°E,39.55°N	0.02	0.07	7.98	2 日 20:54	2 日 23:15	02:21
	阿克苏	1 103.8	80.23°E,41.12°N	早晨	80.27°E,41.28°N	0.11	0.05	18.12	5 日 07:30	5 日 11:16	03:46
				傍晚	80.34°E,41.27°N	0.11	0.05	17.54	7 日 20:54	7 日 23:16	02:22
	库车	1 081.9	83.07°E,41.72°N	早晨	83.10°E,41.73°N	0.03	0.01	3.34	6 日 08:12	6 日 11:15	03:03
				傍晚	82.95°E,41.69°N	0.12	0.03	3.58	4 日 20:24	4 日 23:15	02:52
	库尔勒	931.5	86.13°E,41.75°N	早晨	85.92°E,41.66°N	0.21	0.09	12.12	5 日 07:30	5 日 11:15	03:45
				傍晚	86.04°E,41.77°N	0.09	0.02	18.81	4 日 20:24	4 日 23:15	02:52

式中:r 和 n 为反演资料和探空实测资料相应的时间;f_r 和 r_n 分别为相应时次的 AIRS 反演要素值和探空实测要素值。

3 对比分析

3.1 温度廓线

地面气象观测站点资料和大气红外探测器(AIRS)反演的中国区域地面气温比较结果表明,AIRS 地面气温的反演误差主要以系统性误差为主,地形的影响是主要误差来源,下垫面的不同也会对 AIRS 地面气温反演有较大影响[23]。

塔中站早晨 AIRS 反演温度在 200 hPa 以下偏低明显与沙漠腹地的热对流有关。在晴空条件下,沙漠腹地因很强的地表长波辐射产生深厚的热对流,这种热对流最高可发展 5 000 m 的高空[28-29],而 AIRS 卫星反演产品低估了这种热对流,使得反演温度偏低。由于沙漠腹地 200 hPa 以上的上对流层空气水汽含量极低,使得温度随着高度的升高急剧下降,同样的,反演产品也低估了这种温度直减率,使得在 200 hPa 以上的高空,反演温度较探空温度偏高。

傍晚时分,太阳短波辐射减弱,温度逐渐降低,然而由于白天的高温使得地表温度极高,地面长波辐射加热低层大气,同时,由于塔中站地处塔里木盆地中(图 2a),低层热量无法快速散开,能量在低层聚集,使得 700 hPa 以下的低空降温较白天不明显,温度直减率在低层较低,而 AIRS 反演产品低估了这种地表辐射加热和盆地聚集能量的作用,使得傍晚前后的反演温度在低层低于探空温度。由于大气干燥,比热容较低,探空温度在 700 hPa 以上随着高度的升高急剧降低,使得 AIRS 反演温度在 200 ~ 700 hPa 之间较探空温度偏高。在 200 hPa 以上 AIRS 反演温度较探空温度偏低。无论在早晨还是傍晚,AIRS 反演的最低温度出现的层次与探空最低温度较为一致,均在 70 hPa 附近,但 AIRS 反演的最低温度在偏高,傍晚偏低。与探空温度相比,在早晨和傍晚 AIRS 反演的近地面附近最高温度均偏低。

与沙漠下垫面相比,绿洲站 AIRS 反演温度与探空的偏差无论在白天还是夜间均明显偏小,且在白天偏小幅度较大。在沙漠东部绿洲的若羌站,AIRS 反演温度与塔中探空温度在早晨 100 hPa 以上、300 ~ 500 hPa 之间吻合(图 3),100 ~ 300 hPa 之间偏低,500 hPa 以下偏高较明显。这种较大偏差可能与若羌站地处面积较小的绿洲有关。在傍晚,两者的一致性较好,仅在 500 hPa 以下 AIRS 反演温度略偏高。在沙漠南部绿洲的民丰站,AIRS 反演温度与探空温度在傍晚非常接近。AIRS 反演温度早晨在 200 hPa 以下略偏低,偏低幅度很小。在沙漠南部绿洲的和田站,AIRS 反演温度与探空温度在两个时次吻合均较好,仅在 600 hPa 以下的低空 AIRS 反演湿度略偏低。

在地处大面积绿洲的喀什、库车站(图 4),AIRS 反演温度与探空温度在两个时次的一致性很好,受地形的影响,白天,阿克苏、库尔勒站 AIRS 反演温度在 500 hPa 一下明显低于探空温度,说明该 AIRS 反演温度在塔里木盆地大面积绿洲地带的试用性较沙漠站和小面积绿洲站好。

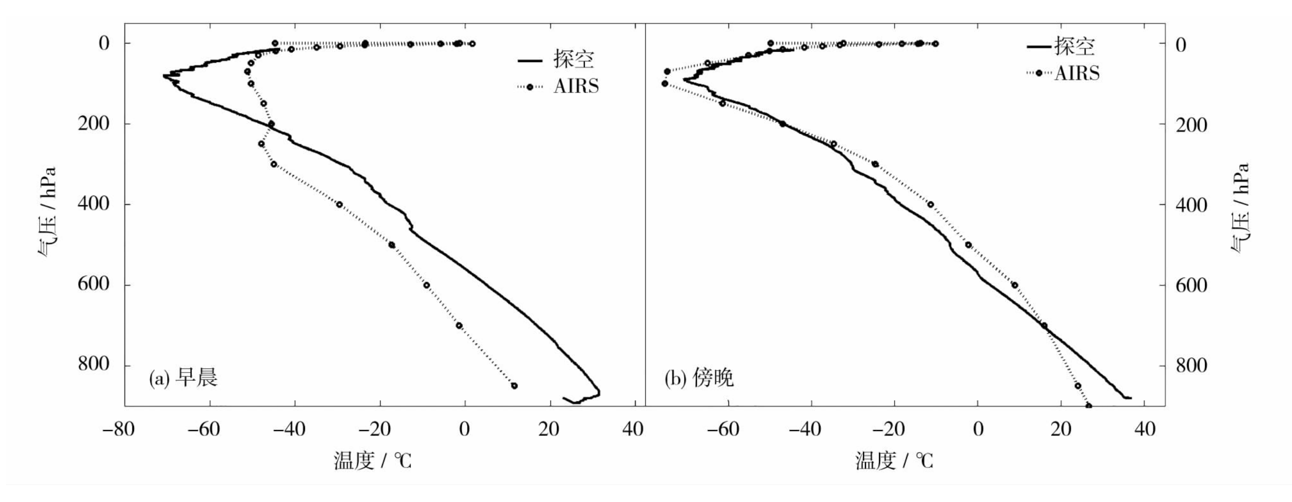


图 2 沙漠腹地塔中站 AIRS 卫星资料温度廓线与探空温度廓线的对比

Fig. 2 Comparison of air temperature form radiosonde and AIRS over Tazhong sounding sites in desert

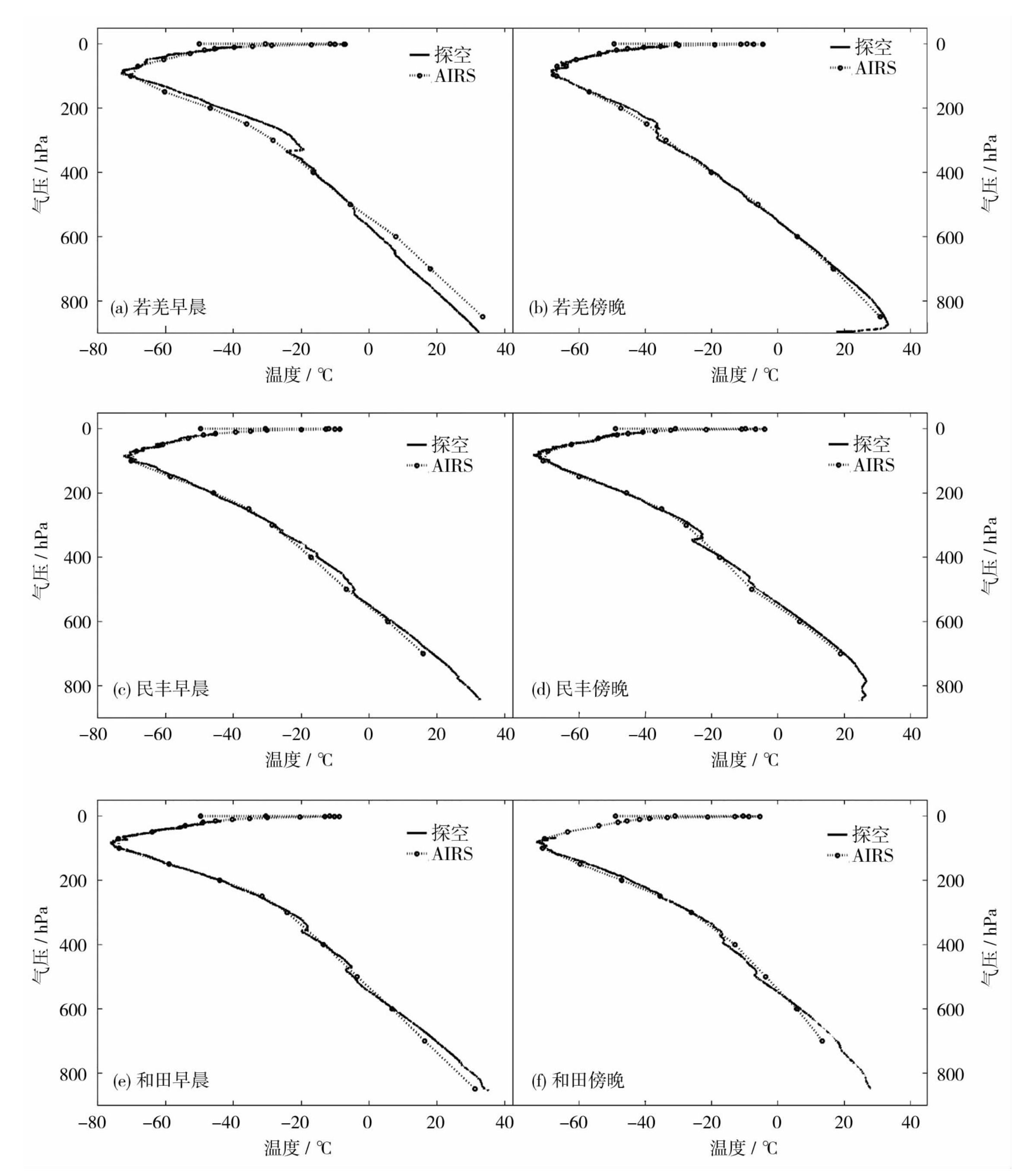


图 3　小面积绿洲站 AIRS 卫星资料温度廓线与探空温度廓线的对比

Fig. 3　Comparison of air temperature form radiosonde and AIRS over sounding sites in small-square oasis

整体而言,除沙漠腹地塔中站和地处小面积绿洲的若羌站以外,塔里木盆地 AIRS 温度廓线与探空资料温度廓线是相当吻合的。在塔中站, AIRS 反演湿度早晨在 200 hPa 以下偏高, 200 hPa 以上偏低。傍晚在 700 ~ 200 hPa 之间偏高, 200 hPa 以上和 700 hPa 偏低。平均而言,与所选 8 个探空温度相比,AIRS 反演最高温度偏低,最低温度偏高。

3.2　高度廓线

地处塔克拉玛干沙漠腹地的塔中探空站早晨和傍晚位势高度廓线与 AIRS 卫星资料反演所得的位势高度廓线的比较结果显示(图 5), AIRS 卫星数据反演所得的位势高度廓线几乎与探空高度廓线完全重合,AIRS 卫星数据反演位势高度仅在 700 ~ 100 hPa 之间略高于探空,最大偏差幅度小于 0.1 gpm。

地处塔克拉玛干沙漠周边小面积绿洲的若羌、民丰和和田 3 个探空站早晨和傍晚位势高度廓线与 AIRS 卫星资料反演所得的位势高度廓线的比较结果显示(图6),AIRS卫星数据反演所得的位势高

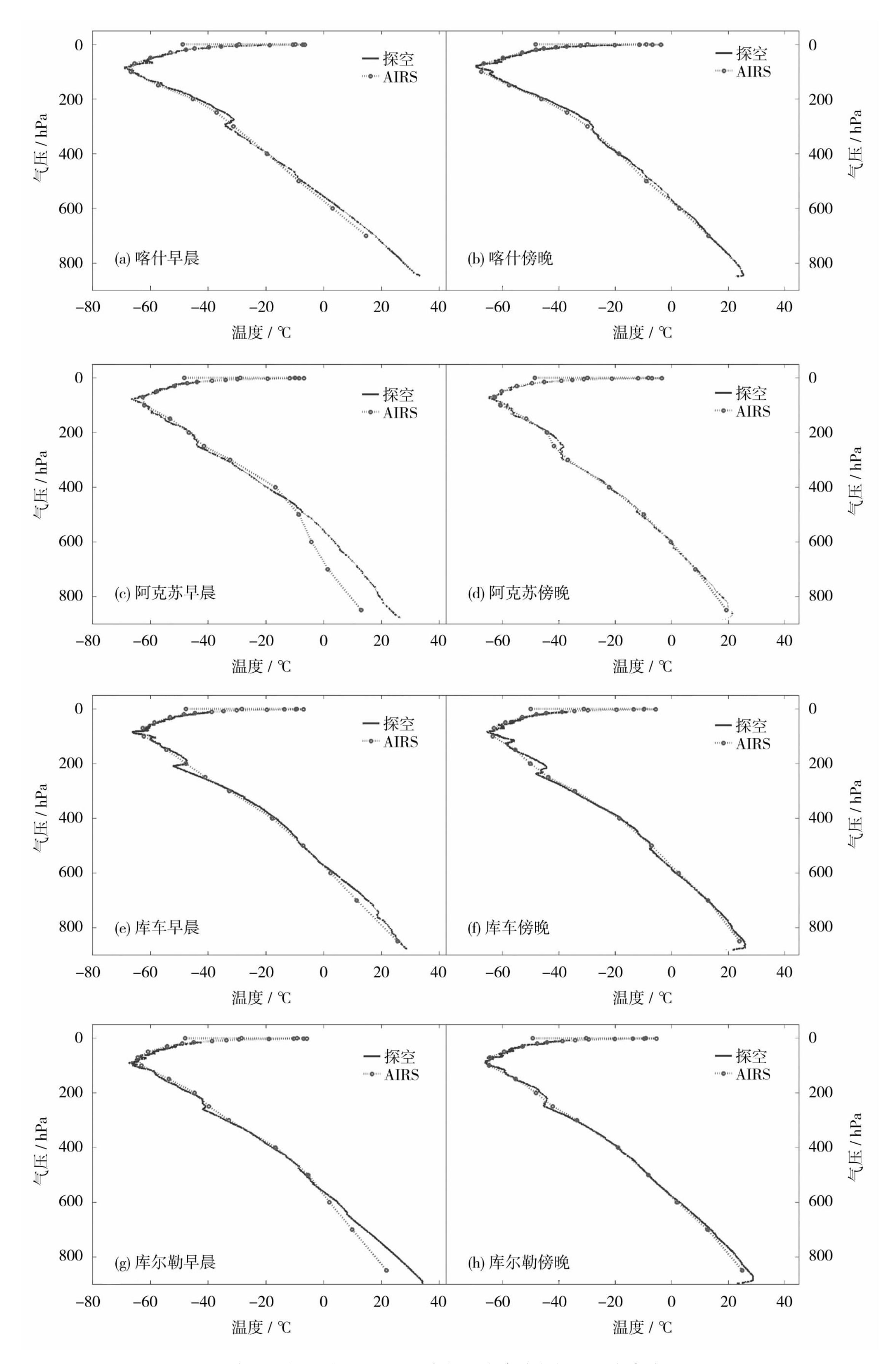


图 4　大面积绿洲站 AIRS 卫星资料温度廓线与探空温度廓线的对比

Fig. 4　Comparison of air temperature form radiosonde and AIRS over sounding sites in large-range oasis

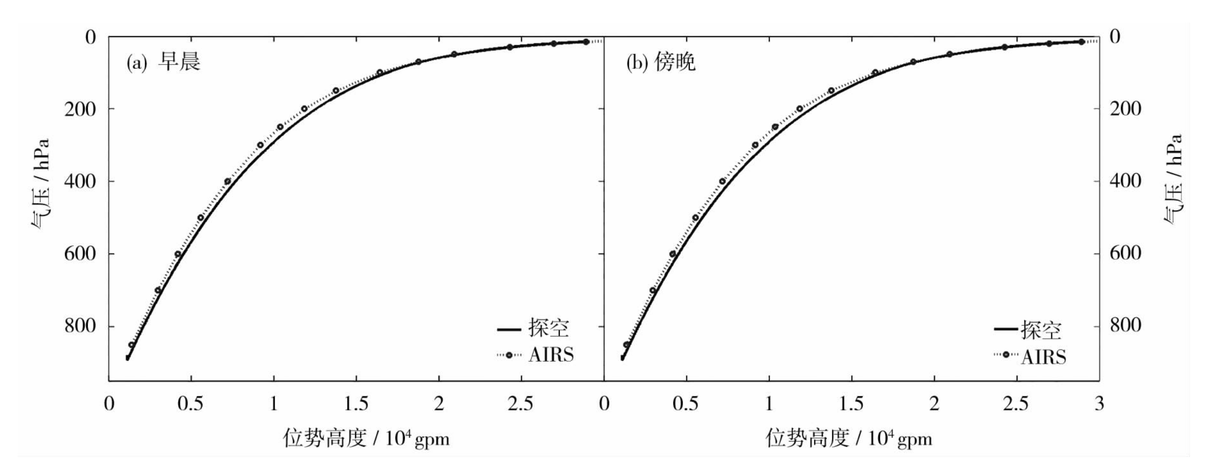


图 5　沙漠腹地站 AIRS 卫星资料反演位势高度与探空位势高度的对比

Fig. 5　Comparison of geopotentail height form radiosonde and AIRS in Tazhong sounding sites in desert

图 6 小面积绿洲站 AIRS 卫星资料位势高度廓线与探空位势高度廓线的对比

Fig. 6 Comparison of geopotentail height form radiosonde and AIRS over sounding sites in small-square oasis

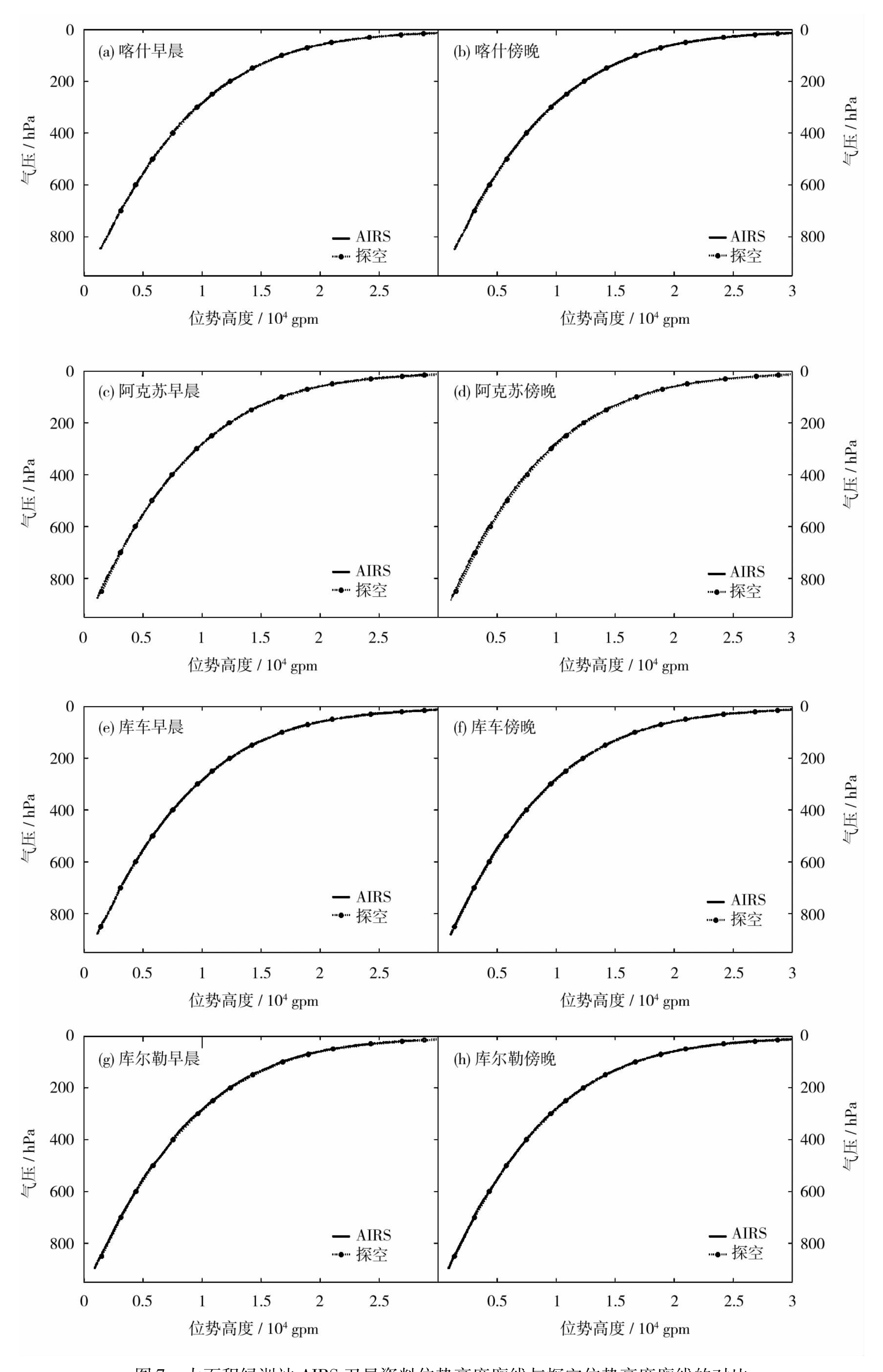


图 7 大面积绿洲站 AIRS 卫星资料位势高度廓线与探空位势高度廓线的对比

Fig. 7 Comparison of geopotentail height form radiosonde and AIRS over sounding sites in large-range oasis

度廓线几乎与探空高度廓线完全重合。并且 AIRS 探测层次能达到 1 hPa,探测高度高于探空。

地处塔克拉玛干沙漠周边大面积绿洲的喀什、阿克苏、库车和库尔勒 43 个探空站早晨和傍晚位势高度廓线与 AIRS 卫星资料反演所得的位势高度廓线的比较结果显示(图 7),AIRS 卫星数据反演所得的位势高度廓线几乎与探空高度廓线完全重合,并且 AIRS 探测高度高于探空,探测层次能达到 1 hPa。

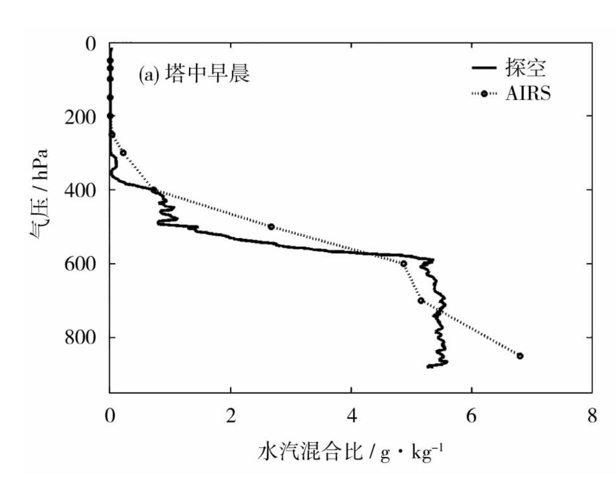
塔克拉玛干沙漠腹地塔中站及周边 7 个绿洲探空站早晨和傍晚位势高度与 AIRS 卫星资料反演所得的位势高度一致性非常好,说明 AIRS 卫星数据反演所得的位势高度在该地区的适用性非常好。与此同时,虽然探空位势高度在垂直方向上的空间分辨率高于探空,但 AIRS 卫星数据反演位势高度已经足以真实地描述大气真实状态。另外,AIRS 探测层次能达到 1 hPa,探测高度高于探空。

3.3 湿度廓线

大气水汽的测量无论对于常规仪器还是包括卫星在内的新型仪器都极具挑战性,尤其是在沙漠下垫面等水汽含量极低的地区。目前国内外有学者已经对 AIRS 探测得到的水汽资料做了一些验证工作。GETTELMAN 等[18]将 AIRS 水汽数据与飞机定点观测进行比较,发现该数据大多是无偏差的,仅在 150 hPa 以上标准误差为 25% 左右。占瑞芬和李建平[11]利用高原探空站资料对大气红外探测器(AIRS)反演的上对流层水汽(UTWV)数据在高原地区的质量进行了检验,发现 AIRS 反演的水汽数据与探空数据是比较一致的,尤其是在 500 hPa 高度。高文华和赵凤生[23]的研究结果也表明 AIRS 湿度廓线产品与 T213 数值模拟结果相比差异一般在 25% 以内。为了进一步验证 AIRS 水汽资料在我国西北地区特别是塔克拉玛干沙漠地区的适用性,我们将塔中、民丰等 8 个站点的探空湿度廓线与 AIRS 卫星所测得的湿度廓线进行了比较。

由图 8 可以看出,早晨 AIRS 反演湿度在 300 hPa 以上与塔中探空湿度一致,其下各层偏差较大,在 800 hPa 以下以偏干为主。傍晚 AIRS 反演湿度在 250 hPa 以上与探空一致,250 ~ 550 hPa 偏湿,550 ~ 750 hPa 偏干,750 hPa 以下各层偏湿。从探空湿度来看,塔中站水汽混合比大于 5 g · kg^{-1}的高湿层在早晨最高在 650 hPa 附近,傍晚升高至 550 hPa,高湿区较早晨深厚。水汽混合比最大值在早晨达到 10 g · kg^{-1}以上,傍晚在 6 g · kg^{-1}以内,近地层较早晨明显偏干。

在沙漠东部绿洲的若羌站,AIRS 反演温度与塔中探空温度在早晨吻合(图 9),在傍晚,两者的一致性也较好,仅在 200 hPa 以上 AIRS 反演温度略偏高,200 hPa 以下略偏低。在沙漠南部绿洲的民丰、和田站,AIRS 反演湿度在 300 hPa 以上与探空湿度一致,其下各层偏差较大。民丰站在 600 hPa 以下早晨以偏湿为主,傍晚以偏干为主。从探空湿度来看,民丰站水汽混合比大于 5 g · kg^{-1}的高湿层在早晨和傍晚最高均在 600 hPa 附近,差别不大。水汽混合比最大值在早晨达到 7 g · kg^{-1}左右,傍晚达 9 g · kg^{-1}以内,近地层较早晨明显偏湿。和田站早晨 300 hPa 以下以偏湿为主,傍晚 300 ~ 500 hPa 偏干,500 hPa 以下偏湿。水汽混合比大于 4 g · kg^{-1}的高



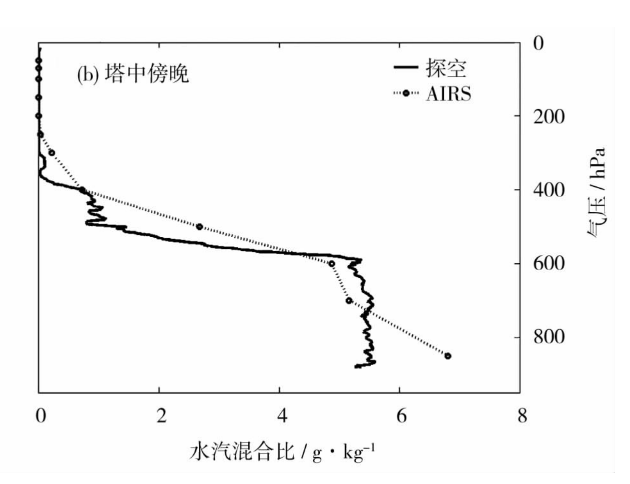


图 8 沙漠腹地站 AIRS 卫星资料水汽混合比廓线与探空水汽混合比廓线的对比

Fig. 8 Comparison of water vapor mixing ratio profiles form radiosonde and AIRS over Tazhong sounding sites in desert

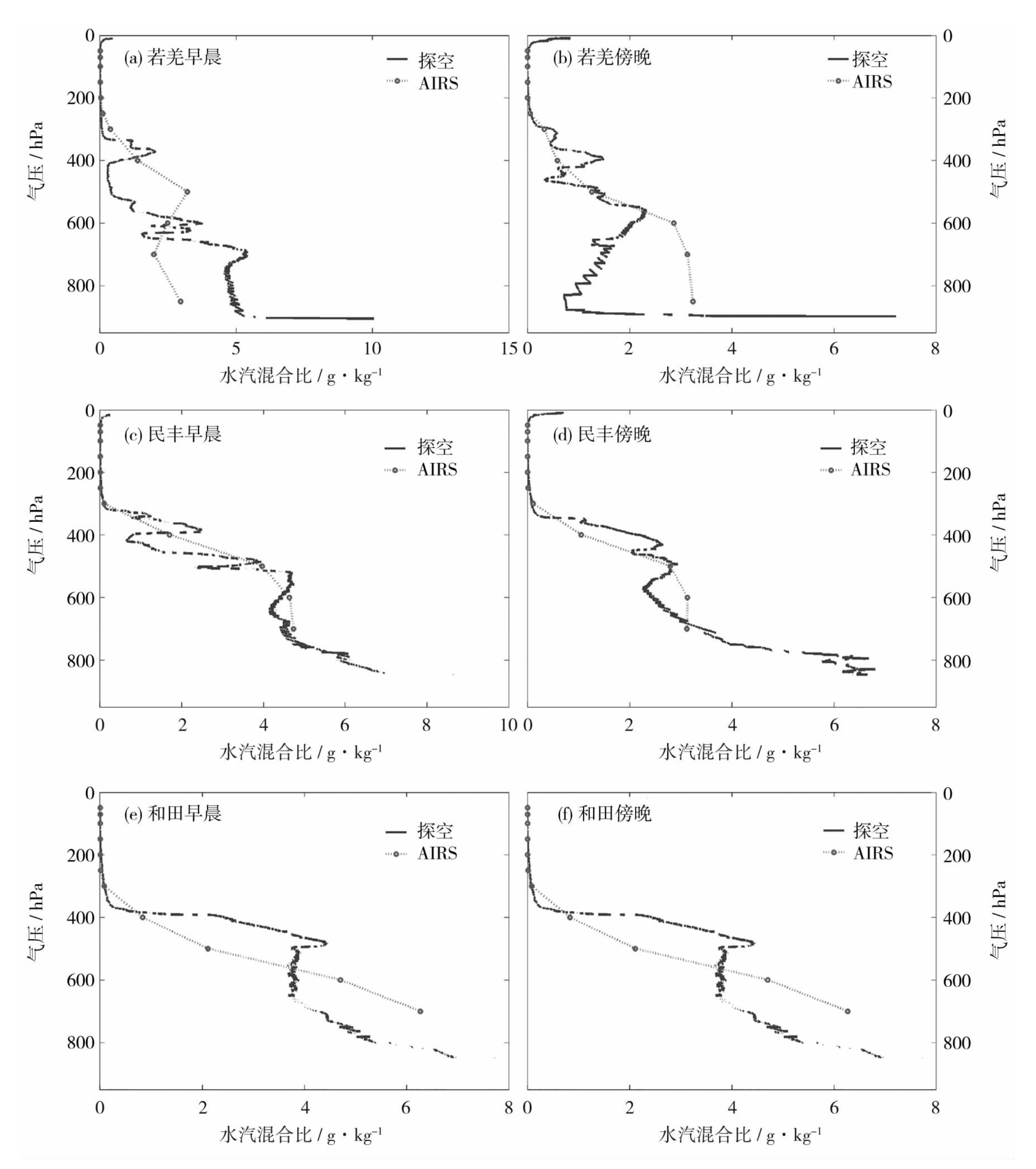


图 9　小面积绿洲站 AIRS 卫星资料水汽混合比廓线与探空水汽混合比廓线的对比

Fig. 9　Comparison of water vapor mixing ratio profiles form radiosonde and AIRS over sounding sites in small-square oasis

湿层厚度在早晨和傍晚差别不大。早晨探空探测到的近地层最高水汽混合比接近 10 g · kg^{-1},傍晚不到 8 g · kg^{-1},较早晨偏干。

从图 10 可见,在沙漠西部绿洲的喀什站,AIRS 反演温度廓线与探空温度廓线在早晨和傍晚均接近重叠,说明 AIRS 反演温度廓线在喀什地区的适用性很好。在沙漠北部绿洲,库尔勒 AIRS 反演湿度早晨在 300 hPa 以上与空湿度一致,300 ~ 400 hPa 偏干,400 hPa 以下偏湿,傍晚 250 hPa 以上与空湿度一致,250 ~ 600 hPa 偏干,600 hPa 以下偏湿。从探空湿度来看,库尔勒站水汽混合比大于 5 g · kg^{-1}的高湿层顶早晨和傍晚均达到 600 hPa 以上的高度,相差不大。但探空探测到的近地层最高水汽混合比在早晨达 12 g · kg^{-1}以上,傍晚略低,在 10. 5 g · kg^{-1}左右。库车站 AIRS 反演湿度早晨在 550 hPa 以上与空湿度一致,550 hPa 以下偏湿,傍晚 250 hPa 以上与空湿度一致,250 ~ 750 hPa 偏干,750 hPa 以下偏湿。从探空湿度来看,库车站水汽混合比大于 5 g · kg^{-1}的高湿区顶早晨和傍晚均达到 550 hPa 附近,相差不大。但探空探测到的近地层最高水汽混

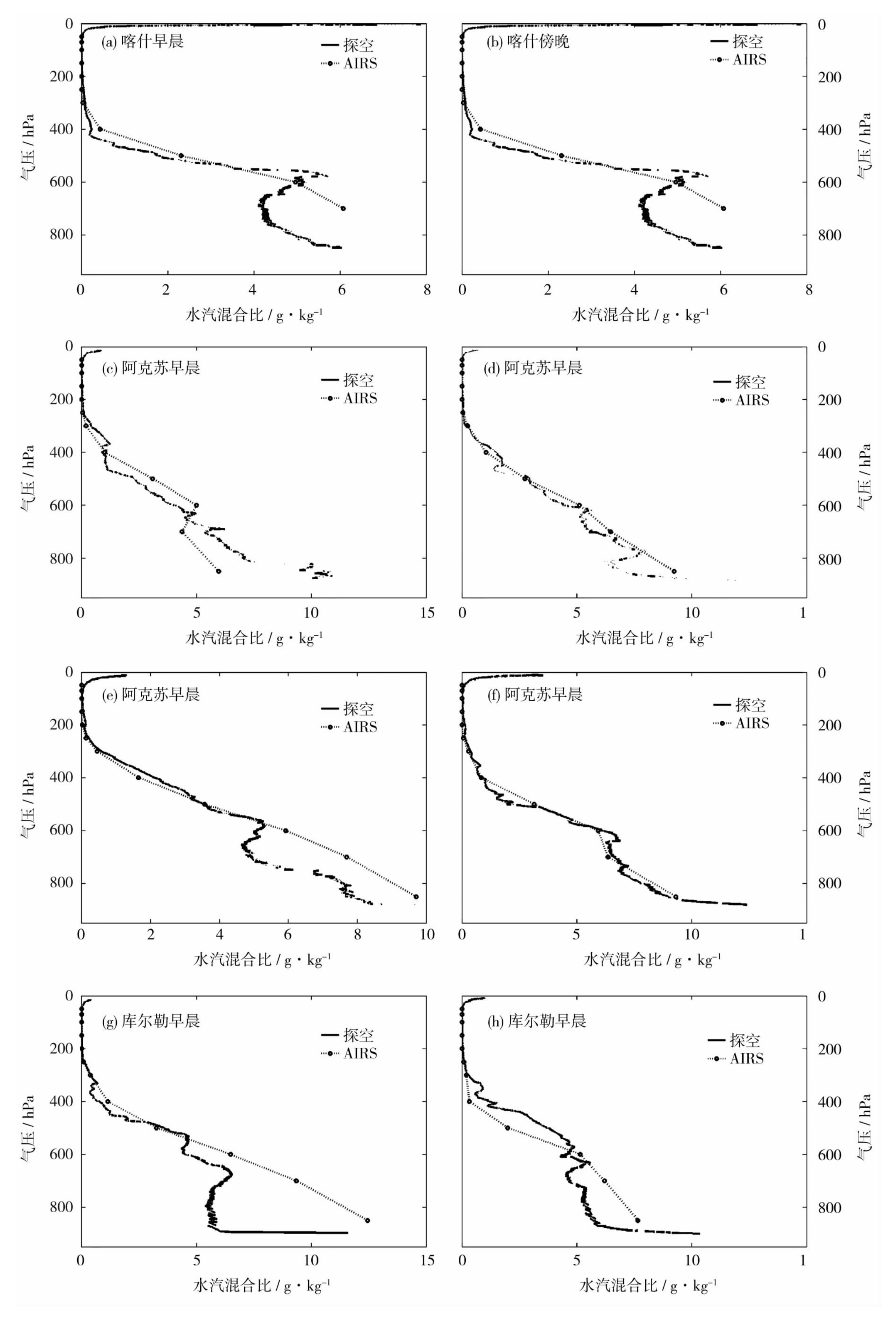


图 10 大面积绿洲站 AIRS 卫星资料水汽混合比廓线与探空水汽混合比廓线的对比

Fig. 10 Comparison of water vapor mixing ratio profiles form radiosonde and AIRS over sounding sites in large-range oasis

合比在早晨不到 10 g·kg⁻¹以上,傍晚在 10.5 g·kg⁻¹左右,较早晨偏湿。阿克苏站 AIRS 反演湿度早晨在 250 hPa 以上与空湿度一致,300～400 hPa、650 hPa 以下偏干,400～650 hPa 之间偏湿。傍晚 200 hPa 以上、550～700 hPa 与空湿度一致,250～550 hPa 偏干,700 hPa 以下偏湿。从探空湿度来看,阿克苏站水汽混合比大于 5 g·kg⁻¹的高湿层顶早晨均达到 600 hPa 附近,傍晚在 800 hPa,较早晨浅薄。探空探测到的近地层最高水汽混合比在早晨不到 11 g·kg⁻¹左右,傍晚仅为 7 g·kg⁻¹左右,较早晨明显偏干。综合来看,在塔克拉玛干沙漠南缘绿洲库尔勒、库车、阿克苏三站,AIRS 反演水汽混合比整体上在 300 hPa 以上与探空水汽混合比一致,除了阿克苏站早晨廓线外,AIRS 反演水汽混合比在阿克苏站傍晚及其余站在 700 hPa 以下均以偏湿为主。各个站在 300～700 hPa 之间多以偏干为主。上述三站低层水汽混合比大于 5 g·kg⁻¹的高湿区顶高度在早晨和傍晚的差别不明显。库车站和库尔勒站近地层傍晚较早晨偏湿,阿克苏站偏干,且无论早晨还是傍晚,阿克苏站的近地层最大水汽混合比均较其余两站低。

总体而言,沙漠腹地及周边绿洲探空站和 AIRS 反演水汽混合比廓线均表明响应地区水汽的"上干下湿"分布状态,各站 300 hPa 以上两种廓线产品吻合度较好,探空水汽混合比随高度的增加并非单调递减,水汽混合比大于 5 g·kg⁻¹的高湿区在白天非常浅薄。另外,在沙漠腹地和小片绿洲上空,湿度在中低层出现了明显的突变,如塔中站、民丰站、和田站、若羌站和喀什站,而在绿洲面积较大区域,湿度随高度逐渐递减,如库尔勒站、库车站和阿克苏站。

3.4 统计分析

从以上 8 站廓线的对比结果可以看到,AIRS 卫星资料与探空资料的吻合度很高,尤其是温度资料和位势高度资料。但由于只有一个时次的样本点,这些比较结果是否具有代表性还需做统计分析。下面,我们将 2016 年 7 月 1 日～15 日的 AIRS 资料与加密探空资料进行统计分析,每个站点筛选出了 10 个左右样本点,由于 AIRS 卫星的位势高度数据与探空的位势高度数据近乎完全一致,因此对位势高度资料不需进行统计分析。此外,由于有效的湿度

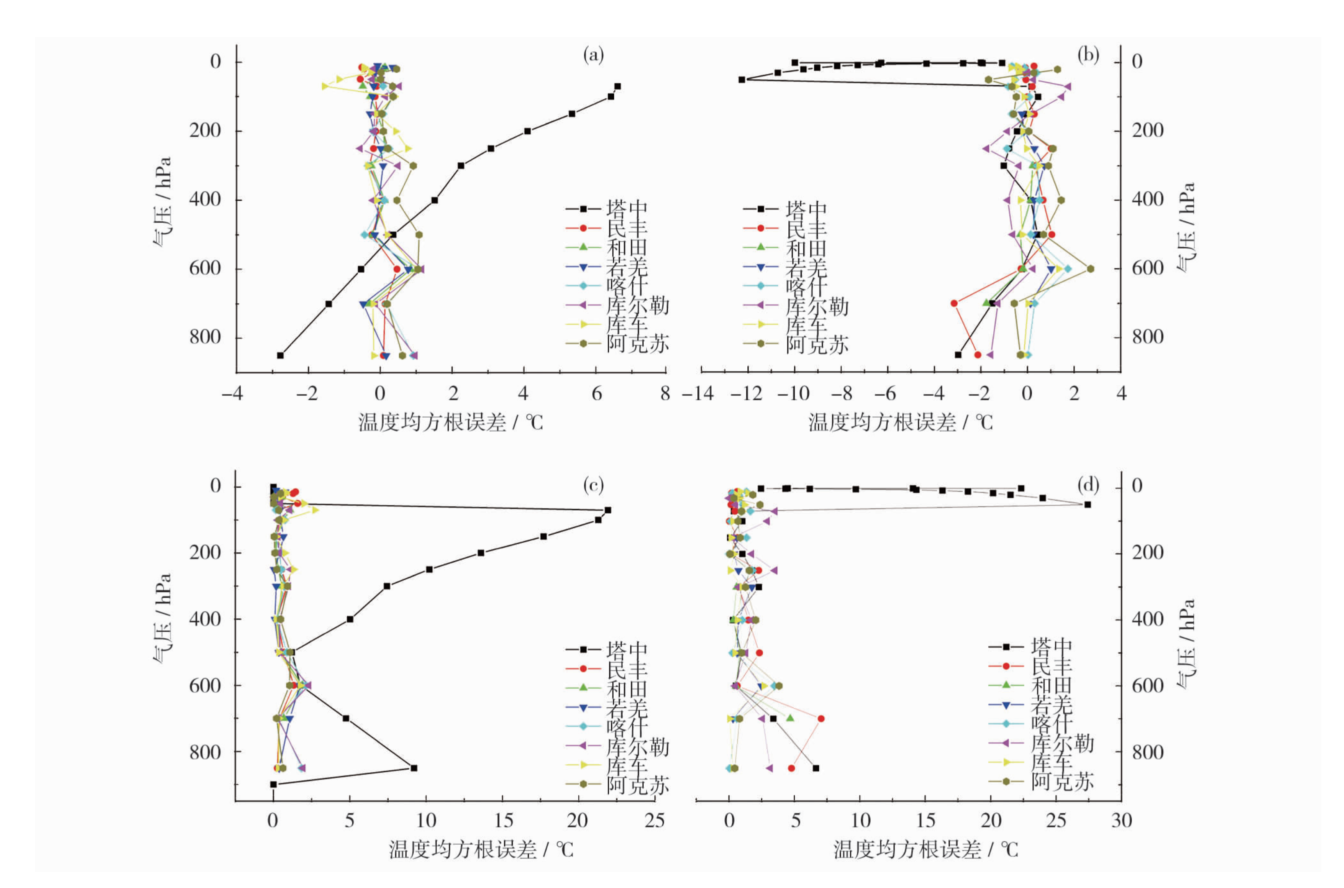


图 11 代表站点 AIRS 卫星与探空温度资料的偏差分布

Fig. 11 Distribution of mean temperature bias between AIRS and radiosonde

资料样本较少,不具有统计意义。因此,本文只对温度数据进行统计,得出两类温度数据之间的平均偏差(*BIAS*)和均方根误差(*RMSE*) 结果。

在早晨(图 11a),沙漠腹地的塔中站气温平均偏差在各层均比其余 7 个绿洲站明显偏大,AIRS 反演温度较沙漠腹地塔中站探空气温在 500 hPa 以下的低层明显偏冷,在其上明显偏暖,偏差绝对值均在 1℃以内,偏暖幅度随高度的升高而升高。其余 7 个绿洲探空站上空,AIRS 反演温度在 500 hPa 以下的低层以偏暖为主,其上以偏冷为主,且偏差幅度随高度的升高而减小。在傍晚(图 11b),AIRS 反演温度与探空温度的偏差在沙漠站和绿洲站差别不大,500 hPa 以下的低层以偏冷为主,在 500 hPa 以上的高层以偏暖为主,偏差绝对值在 3 ℃以内,在 100 hPa 以上部分站点出现了明显偏冷的情况。除沙漠腹地的塔中站以外,各绿洲站的绝对误差(图 11c、11d)在早晨和傍晚均随高度的升高而减小,在 100 hPa 以上又有逆转。早晨均方根误差小于 2 ℃,傍晚均方根误差小于 4℃,塔中站在早晨出现的这种较大误差(图 11c)与该站沙漠下垫面较大的地表辐射率和其处于塔里木盆地中央的地形条件有关。

4 结 论

本文主要对 2016 年 7 月 1 日 ~ 15 日反演的水汽数据在塔克拉玛干沙漠及周边绿洲地区的可信度作了详细评估。结果表明:

(1) AIRS 卫星资料集里的温度资料与探空数据有很好的吻合度。温度资料在沙漠腹地尚有较小偏差,在周边绿洲地区尤其是其中高层一致性较高。AIRS 反演温度在沙漠腹地的塔中站在早晨各层的偏差明显大于傍晚,其余各站早晨和傍晚反演偏差不大。

(2) AIRS 卫星测得的位势高度资料几乎与探空资料的完全一致,是本对比研究中观测质量最好的要素,但 AIRS 探测层次能达到 1 hPa,探测高度优于探空。

(3) AIRS 资料的混合比在 300 hPa 上的高层与探空吻合,在中层偏小,低层偏高,低层水汽探测误差可能与盆地地形和沙漠下垫面有关。探空资料显示,所选各站水汽混合比大于 5 $g \cdot kg^{-1}$ 的高湿区顶在傍晚较早晨高,但近地层出现的水汽混合比极大值在早晨比傍晚大,早晨的高湿区非常浅薄。在沙漠腹地和小片绿洲上空,湿度在中低层出现了明显的突变,如塔中站、民丰站、和田站、若羌站和喀什站,而在绿洲面积较大区域,湿度随高度逐渐递减,如库尔勒站、库车站和阿克苏站。

(4) 统计结果显示,早晨沙漠腹地 AIRS 反演气温平均偏差在各层均比其余 7 个绿洲站明显偏大。在早晨,沙漠腹地塔中站 AIRS 反演温度较探空气温在 500 hPa 以下的低层明显偏冷,在其上明显偏暖,偏暖幅度随高度的升高而增大。其余 7 个绿洲探空站 AIRS 反演温度在 500 hPa 以下的低层以偏暖为主,其上以偏冷为主,且偏差幅度随高度的升高而减小。傍晚 AIRS 反演温度与探空温度的偏差在沙漠站和绿洲站差别不大,500 hPa 以下以偏冷为主,500 hPa 以上以偏暖为主。除沙漠腹地的塔中站以外,各绿洲站的绝对误差在早晨和傍晚均随高度的升高而减小,在 100 hPa 以上又有逆转。在所有气压层上早晨的温度偏差绝对值均在 1 ℃以内,均方根误差小于 2 ℃,傍晚的温度偏差绝对值在 3 k 以内,均方根误差在 700 hPa 以下的低层较高层大,整体在 4 ℃以内。塔中站在早晨出现的这种较大误差与该站沙漠下垫面较大的地表辐射率和其处于塔里木盆地中央的地形条件有关。

总体上,在塔克拉玛干沙漠及周边绿洲地区,AIRS 卫星的温度、高度资料的适用性很好,能有效弥补这些地形复杂地区探空资料覆盖严重不足的问题,在探空稀疏的沙漠及邻近地区的天气、气候及山地灾害的研究中具有广阔的应用前景。

此外,由于 AIRS 资料的时间分辨率不高,在本文的验证中,AIRS 资料的扫描时间与探空时间具有 3 h 左右的时间差,这可能是造成温度、湿度误差的另一个原因。应当指出的是,由于 AIRS 资料在地形复杂的沙漠地区研究应用尚不多见,本文的结果仅仅验证了 2016 年 7 月 1 日 ~ 15 日 AIRS 卫星资料在塔克拉玛干沙漠及周边绿洲地区的适用性,其在其余季节的适用性还有待今后进一步研究。

参考文献(References)

[1] 延昊,矫梅燕,毕宝贵,等. 塔克拉玛干沙漠中心的沙尘气溶胶观测研究[J]. 中国沙漠,2006,26(3):389 – 393. [YAN Hao, JIAO Meiyan, BI Baogui, et al. Observation on sand-dust aerosol in center of the Taklimakan Desert[J]. Jounal of Desert Research. 2006,26(3):389 – 393.]

[2] 李江风. 新疆气候[M]. 北京:气象出版社,1991. [LI Jiangfeng. Climate of Xinjiang [M]. Beijing: China Meteorological Press,

1991.]

[3] 李江风.塔克拉玛干沙漠和周边山区天气气候[M].北京:科学出版社,2003.[LI Jiangfeng. The weather and climate in the Taklimakan Desert and the surrounding mountains[M]. Beijing: Science Press,2003.]

[4] 普宗朝,张山清,李景林,等.近47 a塔克拉玛干沙漠周边地区气候变化[J].中国沙漠,2010,30(2):413-421.[PU Zongchao,ZHANG Shanqing,LI Jinglin,et al. Climate change of area around Taklimakan Desert during 1961—2007[J]. Jounal of Desert Research,2010,30(2):413-421.]

[5] 刘晓阳,毛节泰,张帆,等.塔克拉玛干沙漠地区水汽分布特征[J].中国科学:地球科学,2012,(2):267-276.[LIU Xiaoyang,MAO Jietai,ZHANG Fan,et al. Characteristics of water vapor distribution in Taklimakan Desert[J]. Chinese Science:Earth Science,2012,(2):267-276.]

[6] 杨青,魏文寿,李军.塔克拉玛干沙漠及周边地区大气水汽量的时空变化[J].科学通报,2008,(S2):64-70.[YANG Qing,WEI Wenshou,LI Jun. Temporal and spatial variations of atmospheric water vapor in the Taklimakan Desert and surrounding areas[J]. Bulletin of Science,2008,(S2):64-70.]

[7] 缪启龙,王晶,何清,等.南疆沙漠腹地大气边界层气象要素廓线分析[J].气象与减灾研究,2009,32(2):6-10.[MIU Qilong,WANG Jing,HE Qing,et al. Analysis of meteorological elements in the atmospheric boundary layer in the hinterland of the southern Xinjiang desert[J]. Meteorological and Disaster Reduction Research,2009,32 (2):6-10.]

[8] 何清.塔克拉玛干沙漠塔中大气边界层结构及地-气相互作用观测研究[D].南京:南京信息工程大学,2009.[HE Qing. Observation of atmospheric boundary layer structure and ground air interaction in the Taklimakan Desert [D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology,2009.]

[9] 杨兴华,何清,阿吉古丽·沙依提,等.塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴过程的大气边界层特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2011,5(6):11-15.[YANG Xinghua,HE Qing,SHAYITI Ajiguli,et al. Analysis of the atmospheric boundary layer characteristics of the sand storm in the hinterland of the Taklimakan Desert[J]. Desert and Oasis Meteorology,2011,5(6):11-15.]

[10] WANG Minzhong,HU Min,ZHANG Jiantao. Vertical structure of summer clear-sky atmospheric boundary layer over the hinterland and southern margin of the Taklamakan Desert[J]. Meteorological Applications. 2016,23:438-447.

[11] 崔丽娜,崔彩霞,李春花,等.塔克拉玛干沙漠及其周边山区水汽时空分布特征[J].安徽农业科学,2012,40(35):17244-17248.[CUI Lina,CUI Caixia,LI Chunhua,et al. Temporal and spatial distribution characteristics of water vapor in the Taklimakan Desert and its surrounding mountains[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2012,40 (35):17244-17248.]

[12] WANG Minzhong,HU Min. Quantitative detection of mass concentration of sand-dust storms via wind-profiling radar and analysis of Z-M relationship[J]. Theoretical and Applied Climatology. 2018,131:927-935.

[13] 占瑞芬,李建平.青藏高原地区大气红外探测器(AIRS)资料质量检验及揭示的上对流层水汽特征[J].大气科学,2008,32(2):242-260.[ZHAN Ruifen,LI Jianping. The quality test of atmospheric infrared detector (AIRS) data of the Tibetan Plateau and the upper tropospheric water vapor characteristics it revealed [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2008,32 (2):242-260.]

[14] WILLIAM L Smith,吕月华.卫星探测的大气资料对改进天气预报是渺茫的或是起关键作用[J].气象科技,1992,(4):7-17.[WILLIAM L Smith,LV Yuehua. The atmospheric data of satellite detection is uncertain or crucial for improving weather prediction[J]. Meteorological Science and Technology,1992,(4):7-17.]

[15] 吴雪宝,MENZEL P,HUANG Allen.高光谱红外卫星资料反演大气和云参数[C]//农业生态与卫星遥感应用技术学术交流会论文摘要集,2006.[WU Xuebao,MENZEL P,HUANG Allen. Hyperspectral infrared satellite data inversion of atmospheric and cloud parameters[C]// Summary of Academic Exchange Conference on Agro Ecology and Satellite Remote Sensing Application Technology,2006.]

[16] 董超华,李俊,张鹏.卫星高光谱红外大气遥感原理和应用[M].北京:科学出版社,2013.[DONG Chaohua,LI Jun,ZHANG Peng. Principles and applications of satellite hyperspectral infrared atmospheric remote sensing[M]. Beijing:Science Press,2013.]

[17] AIRS user guide. http://eosdata.gsfc.nasa.gov/atmodyn/airs/airs-documentation.html.

[18] AUMANN H H,CHAHINE M T,GAUTIER C,et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products and processing systems[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing,2003,41(2):253-264.

[19] PARKINSON C L. Aqua:An Earth-Observing Satellite mission to examine water and other climate variables[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing,2003,41(2):173-183.

[20] GETTELMAN A,WEINSTOCK E M,FETZER E J,et al. Validation of Aqua satellite data in the upper troposphere and lower stratosphere with in situ aircraft instruments[J]. Geophysical Research Letters,2004,109(22):359-393.

[21] SUSSKIND J,BARNET C D,BLAISDELL J M. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds[J]. Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on,2003,41(2):390-409.

[22] 刘辉,董超华,张文建,等. AIRS晴空大气温度廓线反演试验[J].气象学报,2008,66(4):513-519.[LIU Hui,DONG Chaohua,ZHANG Wenjian,et al. AIRS atmospheric temperature profile inversion experiment in clear air[J]. Journal of Meteorology,2008,66 (4):513-519.]

[23] 官莉,牟凤军,赵凤环. AIRS与COSMIC反演大气温湿廓线比较[C]//2009苏皖两省大气探测、环境遥感与电子技术学术研讨会专辑,2009.[GUAN Li,MOU Fengjun,ZHAO Fenghuan. AIRS and COSMIC inversion of atmospheric temperature and wet profile comparison in 2009[C]// Academic symposium on atmospheric exploration, environmental remote sensing and electronic technology in two provinces of Jiangsu and Anhui,2009.]

[24] 倪成诚,李国平,熊效振. AIRS资料在川藏地区适用性的验证[J].山地学报,2013,31(6):656-663.[NI Chengcheng,LI Guoping,XIONG Xiaozhen. Validation of applicability of AIRS data in Sichuan Tibet area[J]. Journal of Mountain Sciences,2013,31 (6):656-663.]

[25] 高文华,赵凤生,盖长松.大气红外探测器(AIRS)温、湿度反演产品的有效性检验及在数值模式中的应用研究[J].气象学

报,2006,64(3):271 - 280. [GAO Wenhua,ZHAO Fengsheng, GAI Changsong. The validity of the atmospheric infrared detector (AIRS) temperature and humidity inversion products and its application in the numerical model[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006,64 (3):271 - 280.]

[26] LOVELAND T R,REED B C,BROWN J F,et al. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISC over from 1 km AVHRR data[J]. International Journal of Remote Sensing,2000,21(6 - 7):1303 - 1330.

[27] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2003:19 - 21. [SHENG Peixuan, MAO Jietai, LI Jianguo,et al. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Peking University Press,2003:19 - 21.]

[28] 王敏仲,魏文寿,魏刚,等. 风廓线雷达对塔克拉玛干沙漠沙尘及晴空湍流的探测研究[J]. 遥感技术与应用,2014,29(4):581 - 586. [WANG Minzhong, WEI Wenshou, WEI Gang, et al. The detection of wind profile radar on the sand dust and clear air turbulence in the Taklimakan Desert[J]. Remote Sensing Technology and Application,2014,29 (4):581 - 586.]

[29] WANG Minzhong, WEI Wenshou, HE Qing, et al. Summer atmospheric boundary layer structure in the hinterland of Taklimakan Desert, China[J]. Journal of Arid Land,2016,8(6):846 - 860.

Applicability validation and evaluation of AIRS retrievals in the Taklimakan Desert

MA Yu-fen[1,2,3], PAN Hong-lin[2,3], ZHANG Hai-liang[2], LIU Jun-jian[2], LI Man[2], DU Juan[2]

(1 *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029, *China*, ;
2 *Institute of Desert Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Urumqi* 830002, *Xinjiang*, *China*;
3 *Center of Central Asia Atmospheric Science Research*, *Urumqi* 830002, *Xinjiang*, *China*)

Abstract: The temporal and spatial distribution features of air temperatures and humidity in Taklimakan Desert, south Xinjiang, China, could hardly be learned by the seven sounding sites there, while the high resolution atmospheric infrared sounder (AIRS) data can effectively make up for the vacancy. However, the quality of AIRS retrievals suffers from complex topographic condition and land-surface emissivity, it is necessary to do the quality validation before applying them in this desert region. This study mainly focused on quality validation of AIRS retrieved air temperature, geopotential height as well as water vapor mixing ratio by comparing them with the field experimental soundings in both Taklimakan Desert and other seven traditional sounding sites over oasis region at nightfall and in the morning respectively. It is showed that, Firstly, the temperature data in the AIRS satellite data set are in good agreement with the radiosonde observation (RAOB). The temperature data are relatively small in the hinterland of the desert, and higher in the surrounding oasis regions, especially in the upper level. The AIRS inversion of temperature in the tower of the desert hinterland, the deviation of each layer in the morning is obviously greater than that at nightfall, and the other stations have little deviation in the morning and nightfall. Secondly, the geopotential height data measured by AIRS satellite is almost the same as RAOB, which is the best factor in the comparative study. The detection level of AIRS can reach 1 hPa, which is much higher than that of RAOB. Thirdly, mixing ratio of AIRS data coincides with the upper RAOB of 300 hPa, and smaller in the middle layers, higher in the lower layers. Finally, the statistical results showed that in the morning, the AIRS inversion temperature deviation over Tazhong sounding station in each layer were higher than that over the other 7 oasis stations, warmer above 500 hPa and cooler below, and the higher the warmer. While the AIRS inversion temperature over the remaining 7 oasis sounding station is generally higher than soundings above 500 hPa and lower below. The *RMSE* of the AIRS inversion temperature over the selected seven oasis sounding sites is decreased with the height being increased. The *RMSE* of the AIRS inversion temperature over desert sites is acceptably small, but presents a comparatively larger bias in the morning possibly due to the great emissivity there and its location in the center of the Tarim Basin.

Key words: AIRS; Taklimakan Desert; validation; radiosonde